

## 二次元切削機構に関する研究

著者	尾崎 省太郎
号	65
発行年	1964
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/8801">http://hdl.handle.net/10097/8801</a>

氏 名	お ぎ き し ょ う た ろ う 尾 崎 省 太 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 3 9 年 6 月 3 日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 ( 博士課程 ) 精密工学専攻
学 位 論 文 題 目	二次元切削の切削機構に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 佐 藤 健 児
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 佐 藤 健 児 東北大学教授 竹 山 寿 夫 東北大学教授 横 堀 武 夫

# 論文内容要旨

## 1 緒 言

金属材料をバイト工具を用いて切削する場合の切削加工には複雑な現象が多くあり、十分解明されていないようである。これら切削現象の解析にあつては、各種の解析方法が採用されているが、本論文はこのうち切削機構をもととして、金属材料を二次元切削し、流れ型切屑の発生する場合について、考察を行なつたものである。

本論文の特徴とすることは、現在多く行なわれている剪断面を平面と仮定する方法を採用せず、曲面を仮定することから、切削現象に見られる各種現象の解析を行なつたことにある。主要な問題点は次の3つである。

- i) 切屑内の最大伸び方向と剪断面
- ii) 工具切屑接触面での摩擦現象
- iii) 剪断面をもとにした切屑カール

## 2 切屑内の最大伸び方向と剪断面の彎曲

### 2.1 切屑内の最大伸び方向と剪断面の仮定

金属材料をバイト工具等で切削加工する場合、その金属材料は剪断面で大きな剪断塑性変形を受けて切屑となつて排出される。この剪断塑性変形歪は材料側面に描かれた格子模様によつて間接的に観察することもできるが、直接観察することは不可能に近いであらう。

R. Hill<sup>1)</sup>によると、図 2-1 に示されるように、剪断歪  $\tau$  を与えられた多結晶体金属材料内の最大伸び方向  $\theta$  は次のように与えられている。

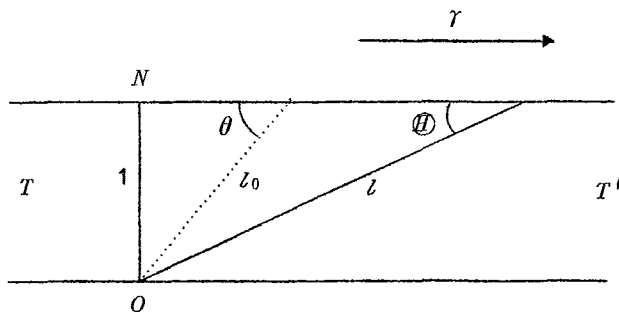


図 2-1 剪断歪と最大伸び方向

本図において、任意の方向 $\theta$ の長さ $l_0$ の素片が長さ $l$ に伸びたとする。

$$\frac{l}{l_0} = (1 - 2r \sin \theta \cos \theta + r^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

でこれらの素片の長さは与えられる。上式で $l/l_0$ が極大となる角 $\theta$ の値が最大伸び方向 $\Phi$ を与えることになる。したがって最大伸び方向 $\Phi$ は次式で与えられよう。

$$2 \cot 2 \Phi = r \quad (2-2)$$

そして R. Hill によると、結晶粒はあたかもこの方向に並んでいるかのように観察されると報告されている。この考え方が切削現象においても適用されるものとすれば、切屑の剪断歪を与えているのは剪断面であり、切屑側面に見られる結晶粒模様から剪断歪を考察することができるのであろう。

切削加工後の切屑の側面を観察すると、図 2-2 に示されるように、結晶粒はある曲線にそって並んでいるかのように見られる。もし切屑が剪断面において単一歪を受けているならば、この結晶粒線模様は曲線でなしに直線となるはずである。しかし観察されるものは曲線である。したがって、切屑は剪断面で単一歪を受けず、不同歪を受けていることになる。工具すくい面近傍では、剪断面によつて与えられた歪以外にすくい面での摩擦仕事があり、この摩擦歪を受けて切



図 2-2 切屑側面の結晶粒模様

屑内の歪に差が生ずることは考えられる。しかし、他の部分は剪断面のみにおいて歪を受けているのであるから、剪断歪が次式で与えられるかぎり、結晶粒線が曲線であることは剪断歪に変化のあることであり、剪断面の剪断角がその位置によつて変化することになるであらう。

$$r = \tan(\phi - \alpha) + \cot \phi \quad (2-3)$$

ここで $\phi$ は剪断角、 $\alpha$ は工具すくい角を現わすものとする。

したがつて剪断面は切屑に単一歪を与える平面でなく、曲面であると考えられよう。著者はこの剪断曲面を円筒面と仮定して解析を行なつた。

解析を進める必要上、工具刃先で発生する剪断曲面の切削方向となす角（初期剪断角 $\phi_0$ ）の仮定を試み、定量的な剪断曲面を設定した。

工具刃先近傍の応力状態は図2-3に示されるように与えられるであらう。ここで $s_f, \sigma_f$ は

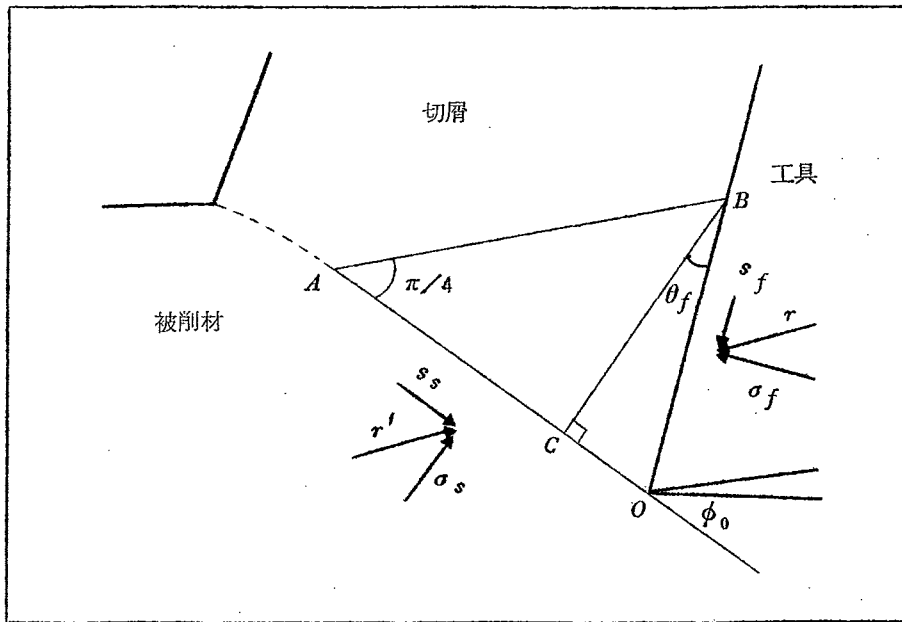


図2-3 工具刃先近傍の応力状態

工具すくい面上の摩擦応力、垂直応力を示し、 $s_s, \sigma_s$ は剪断面上の切線、垂直応力を示すものとする。それらの合成応力 $r, r'$ は当然 $r = r'$ であらう。ここで、剪断曲面は工具刃先より切削方向と $\phi_0$ なる角をもつて、最大剪断応力の方向に発生し、剪断曲面と工具すくい面との間の切屑も塑性状態にあるものと仮定する。

剪断面上の応力 $\sigma_s$ と $s_s$ との間には $k$ を剪断降伏応力として、一般に次の関係がある。

$$k^2 = s_s^2 + (\sigma_s - k)^2 \quad (2-4)$$

しかるに、剪断面  $OA$  を最大剪断応力の方向と仮定したので、合成応力  $\tau'$  は  $OA$  と  $\pi/4$  の角度の方向に作用することになり、 $\sigma_s = s_s$  となる。したがって (2-4) 式は

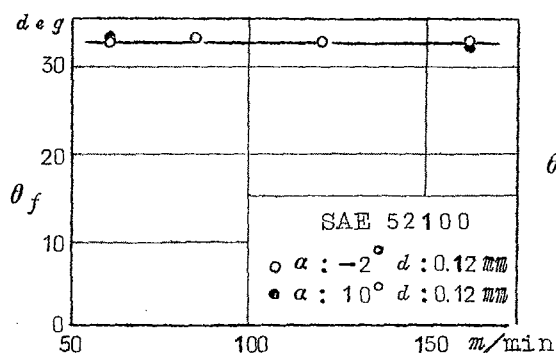
$$k = s_s$$

となる。今  $\angle OBC$  を  $\theta_f$  とすると、すくい面上の応力は次式で与えられよう。

$$s_f = k \cos 2\theta_f \quad (2-5)$$

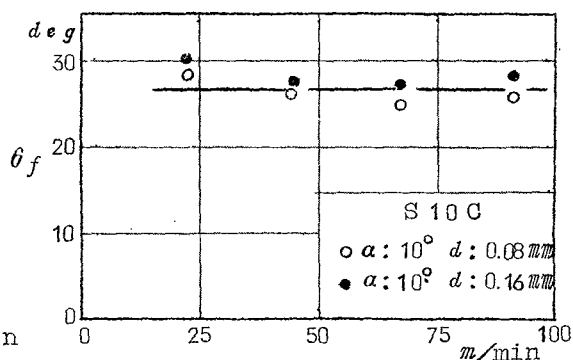
$$\sigma_f = k (1 + \sin 2\theta_f) \quad (2-6)$$

ごく刃先近傍の局所的なこれらの応力を求めることは不可能であるが、 $s_f$  としては工具すくい面上の平均摩擦応力を、 $k$  としては慣用の剪断面上の平均剪断応力を取ればよいであろう。切削実験によれば、図 2-4 に示されるように、(2-5) 式によつて求められる角  $\theta_f$  は切削条



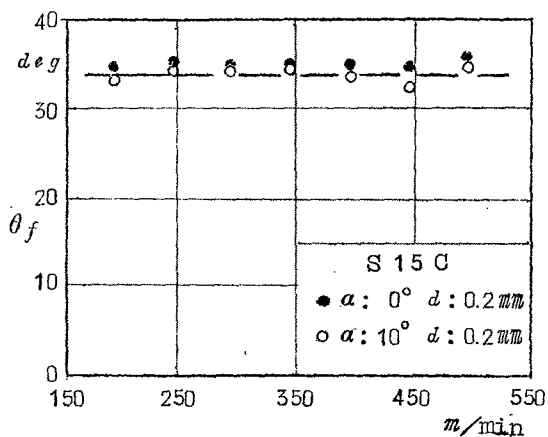
切削速度

(a) Chao & Trigger



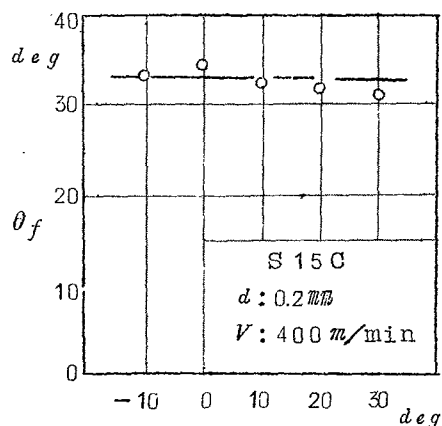
切削速度

(b) 著 者



切削速度

(c) 大 越



すくい角

(d) 大 越

図 2-4 加工条件と  $\theta_f$

件に無関係な定数と考えられる。この角  $\theta_f$  を限界角と名付けることにする。なお、図 2-4 の (a) は Chao と Trigger<sup>2)</sup>、(c) は大越<sup>3)</sup> により発表された実験結果をもとにして計算したものである。

この限界角  $\theta_f$  を用いれば初期剪断角  $\phi_0$  は次式で与えられる。

$$\phi_0 = \theta_f + \alpha \quad (2-7)$$

今、図 2-5 に示すように、剪断曲面を工具刃先 A 点において切削方向と  $\phi_0 = \theta_f + \alpha$  なる

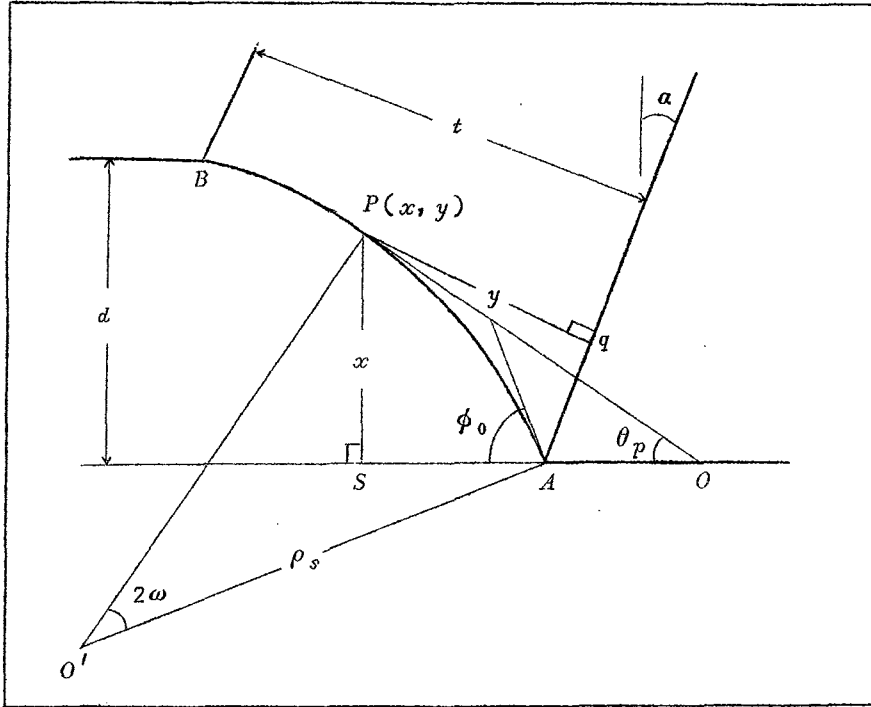


図 2-5 剪断曲面の幾何

角で発生し、半径  $\rho_s$  なる円筒面と仮定する。剪断曲面上の点 P から工具すくい面および刃先の切削方向に下した垂線の長さ  $y$ 、 $x$  は次式で与えられよう。

$$y = \rho_s \{ \sin \theta_p - \sin (\theta_p - \alpha) \} \quad (2-8)$$

$$x = \rho_s \{ \cos \theta_p - \cos (\theta_p + \alpha) \} \quad (2-9)$$

但し  $0 \leq \theta_p \leq \theta_f + \alpha$

ここで  $\theta_p$  は点 P での剪断面の切線と切削方向とのなす角（切線角と名付ける）である。

剪断曲面と被削材の自由表面との交点 B で (2-9) 式の  $x$  の値は切込み深さ  $d$  であり、(2-8) 式の  $y$  の値は切屑厚さ  $t$  にほかならない。この時の切線角を  $\theta_m$ （最小切線角と名付

ける) とすると, 切削比  $rc = d/t$  と最小切線角との関係は次式で与えられる。

$$rc = \frac{\sin \frac{1}{2} (\theta_f + \theta_m + \alpha)}{\cos \frac{1}{2} (\theta_f + \theta_m - \alpha)} \quad (2-10)$$

したがって, 切削実験により切屑厚さの値を求め, 切削比が定まると, 上式より最小切線角の値は定まり, 剪断曲面の曲率半径は次式より求められる。

$$\rho_s = \frac{d}{\cos \theta_m - \cos (\theta_f + \alpha)} \quad (2-11)$$

## 2.2 切屑側面の結晶粒模様

図 2-5 で, 剪断曲面上の点  $P$  での剪断歪  $\gamma_p$  は次式で与えられよう。

$$\gamma_p = \cot \theta_p + \tan (\theta_p - \alpha) \quad (2-12)$$

この剪断歪  $\gamma_p$  だけ材料は剪断面で剪断変形するのであるから, その場合の材料の最大伸び方向  $Q_p$  は次式で与えられる。

$$Q_p = \frac{1}{2} \cot^{-1} \frac{1}{2} \{ \cot \theta_p + \tan (\theta_p - \alpha) \} \quad (2-13)$$

したがって, 結晶粒の最大伸び方向と工具すくい面とのなす角  $\textcircled{Q}_p$  (流線角と名付ける) は次式で与えられる。

$$\textcircled{Q}_p = \frac{\pi}{2} + \alpha - \theta_p - Q_p \quad (2-14)$$

この流線角の正切は結晶粒の最大伸び方向で作る結晶粒線の勾配となる。したがって, 切線近似により結晶粒線の形は決定される。数値計算結果の一例を図 2-6(a) に, その計算に用いた条件での実測例を(b)図に示す。

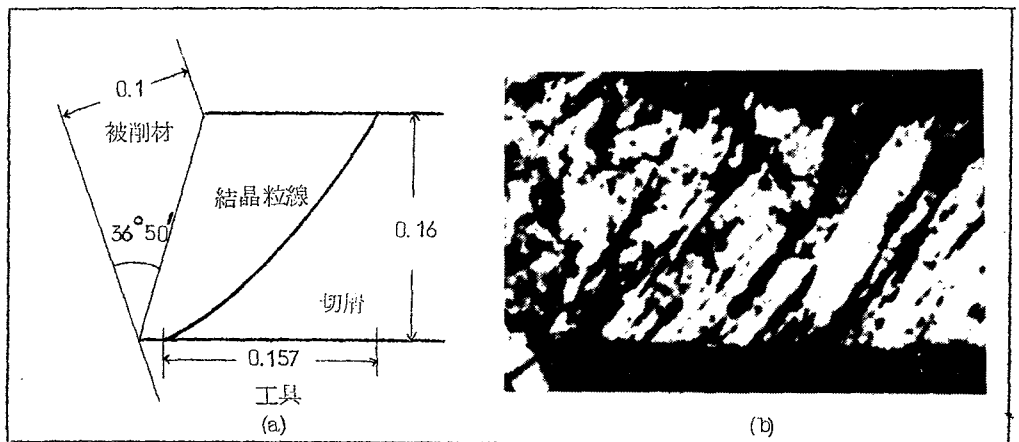


図 2-6 結晶粒線の計算例



この両図を比較するに、剪断曲面を円筒面と仮定しても、第1近似としてよく合致すると云えよう。

なお、図2-6の条件では、切削比は0.625であり、工具すくい角は $30^\circ$ 、慣用の剪断角は $36^\circ 50'$ である。したがって剪断曲面の曲率半径は $0.366\text{mm}$ と計算される。

剪断面を曲面と考えた場合、剪断面を平面と考えた場合よりどの程度のふくらみ量を持っているかを求めて見よう。図2-7に示すように、このふくらみ量 $\Delta$ は次式で与えられる。

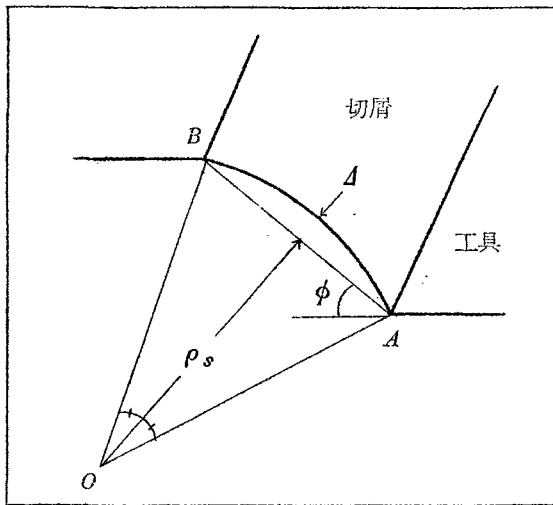


図2-7 剪断曲面のふくらみ量

$$\Delta = \rho_s \{ 1 - \cos(\theta_f + \alpha - \phi) \} \quad (2-14)$$

上式に(2-11)式を代入すれば

$$\theta_m = 2\phi - \theta_f - \alpha$$

であるから

$$\Delta = d \cdot \frac{1 - \cos(\theta_f + \alpha - \phi)}{\cos(2\phi - \theta_f - \alpha) - \cos(\theta_f + \alpha)} \quad (2-15)$$

と書き換えられる。図2-6での結果を代入すると、ふくらみ量 $\Delta$ は $0.016\text{mm}$ となる。この程度のふくらみ量は、図2-6(b)の写真などの上では、剪断面が平面であるか曲面であるか判別し難いほど小さいものであろう。すなわち、剪断曲面は円筒状をなしているが、その曲率半径は大きく、写真観察などによつてそれ程明らかに観察される量ではないものと云えよう。

### 2.3 限界角をもとにした工具切屑接触長さと切削方程式

図2-4に示したように、金属切削において、剪断面上の剪断応力 $s_s$ と工具すくい面上の摩擦応力 $s_f$ との比は切削条件によらず一定の値を取ることが見出された。すなわち限界角とそれ

らの間に

$$s_f / s_s = \cos 2\theta_f = \text{一定} \quad (2-16)$$

の関係のあることが実験的に見出された。

切削巾を $b$ ，工具切屑接触長さを $l$ ，摩擦角を $\beta$ とすると工具すくい面上の摩擦応力，剪断面上の剪断応力はそれぞれ

$$s_f = \frac{R}{b \cdot l} \sin \beta$$

$$s_s = \frac{R}{b \cdot d} \sin \phi \cos (\phi - \alpha + \beta)$$

但し $R$ は全切削抵抗

であるから，工具切屑接触長さ $l$ は次式で与えられよう。

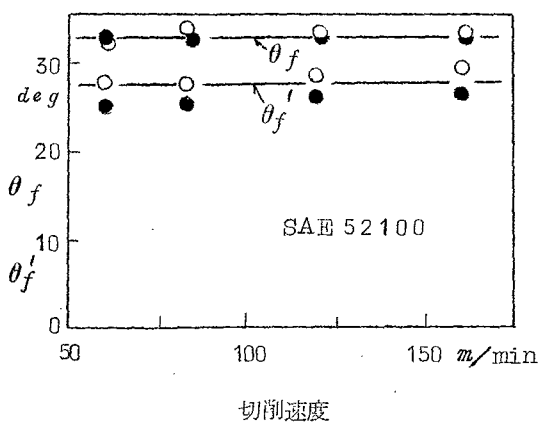
$$l = \frac{d \cdot \sin \beta}{\cos 2\theta_f \sin \phi \cos (\phi - \alpha + \beta)} \quad (2-17)$$

これは限界角を用い工具切屑接触長さを表わす関係式である。

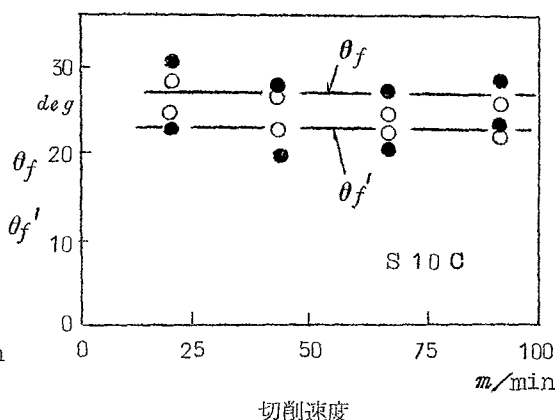
工具切屑接触部の終了点と剪断面の自由表面との交点とを結ぶ線が，工具すくい面とのなす角を $\theta_f'$ とすると，この角は幾何学的に次の関係式で表わされる。

$$\tan \theta_f' = \frac{d \cdot \cos (\phi - \alpha)}{l \sin \phi - d \sin (\phi - \alpha)} \quad (2-18)$$

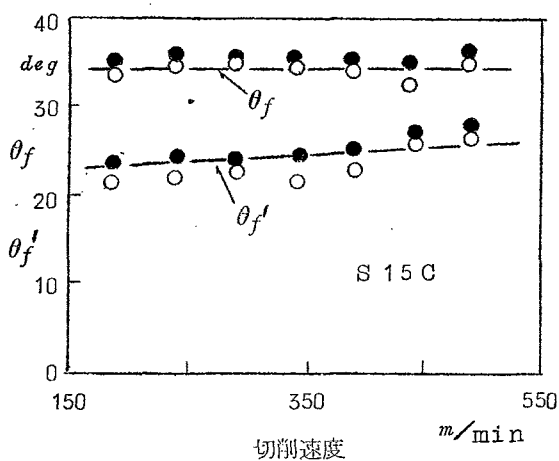
切削実験を行つてみると，(2-16)式で求められた角 $\theta_f$ と(2-18)式で求められた角 $\theta_f'$ とは，図2-8に示すように，第一近似のオーダで一致しているものと考えられる。したがつて，(2-17)式と $\theta_f' = \theta_f$ と読みかえた(2-18)式とから $l$ を消去することにより次の関係式が求められる。



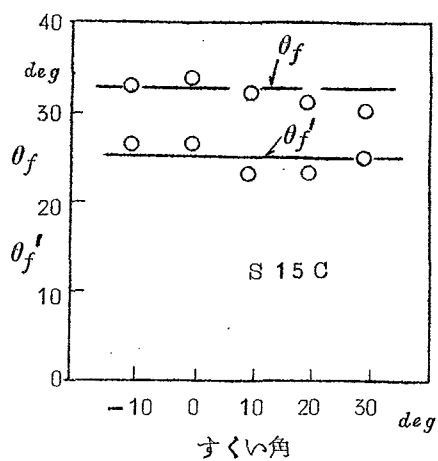
(a) Chao & Trigger



(b) 著者



(c) 大 越



(d) 大 越

図 2-8 加工条件と  $\theta_f$ ,  $\theta_f'$  (加工条件は図 2-4 と同じ)

$$\cot \beta = \tan(\phi - \alpha) + \frac{\tan \theta_f}{\cos 2\theta_f \cos(\phi - \alpha) \{ \tan \theta_f \sin(\phi - \alpha) + \cos(\phi - \alpha) \}} \quad (2-19)$$

これは限界角  $\theta_f$  をもとにする切削方程式である。数値計算例を図 2-9 に示す。

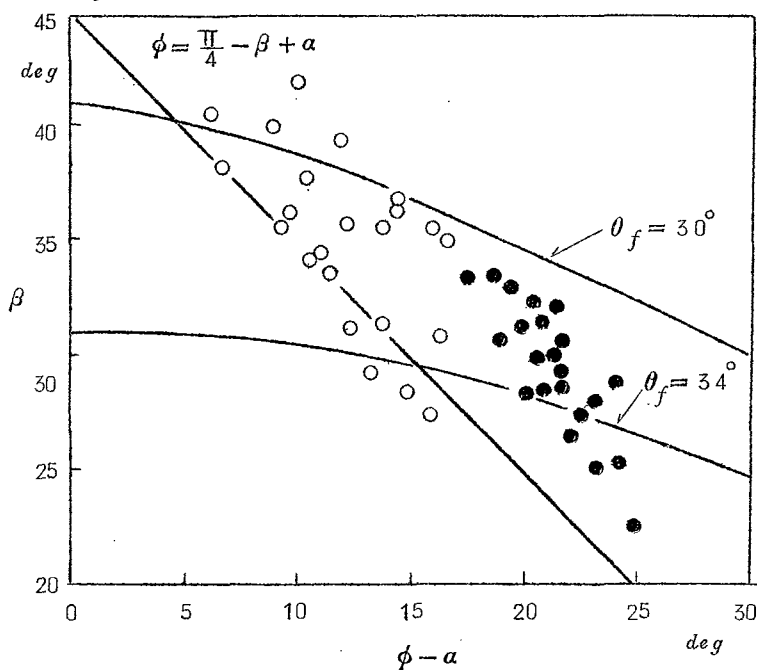


図 2-9 切削方程式と実験点

実験データをもとにして数値計算を行なってみると、

$$D = \tan \theta_f \sin(\phi - \alpha) + \cos(\phi - \alpha)$$

の値はほぼ1に等しい。したがって(2-19)式は次式に変形される。

$$\cos(\phi - \alpha + \beta) = \frac{\tan \theta_f}{\cos 2\theta_f} \sin \beta \quad (2-20)$$

この関係を(2-17)式に代入すれば切込み $d$ と工具切屑接触長さ $l$ との近似関係式が導かれよう。

$$l = d \cot \theta_f \operatorname{cosec} \phi \quad (2-21)$$

図2-10に実測された工具切屑接触長さ $l$ と、剪断角、限界角より計算した計算値とを示す。近似計算を行つたのにもかかわらず、よく一致しているものと考えられる。

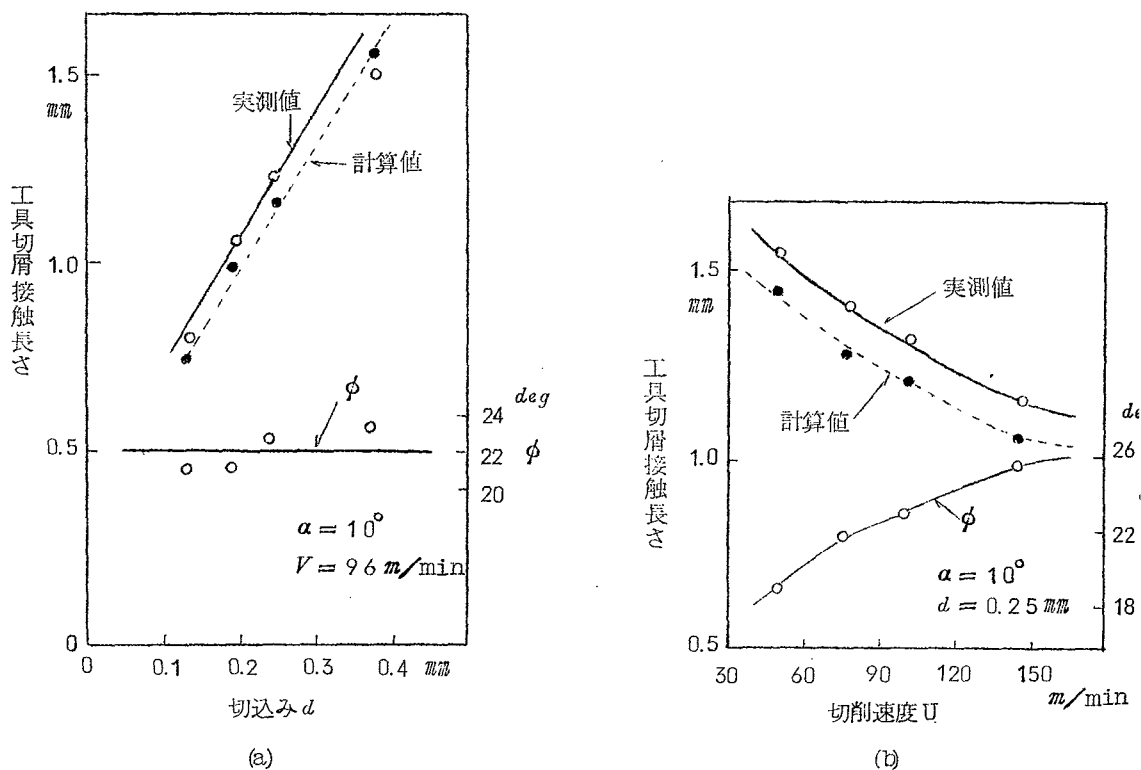


図2-10 工具切屑接触長さの実測値と計算値の比較

### 3 高温摩擦と工具切屑接触面の摩擦現象

#### 3.1 高温における摩擦実験

金属材料をバイト工具を用いて切削する場合、工具切屑接触面を流れ去る切屑は切削された直後の金属面であり、その接触部は処女面であると推定される。また図3-1に示されるように、金属切削における切削温度の測定から、工具切屑接触面における温度は数百度にも達していることが推察される。このように金属の処女面で、かつ、材料の温度も変化させて高温時の摩擦現象

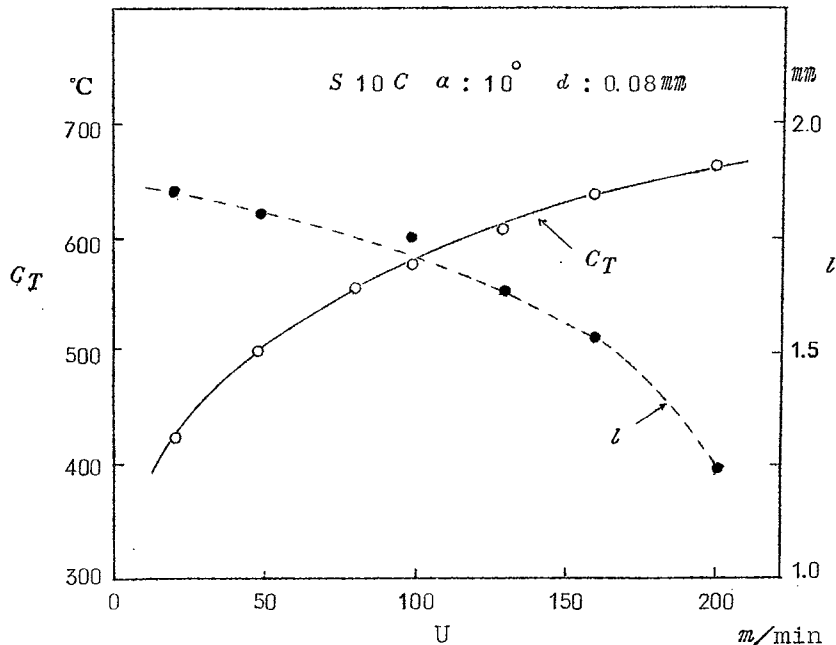


図3-1 切削速度と切削温度  $C_T$

を調べることは実験的に非常に困難なものであろう。著者は、円錐先端圧子を被削材に押込み、ひつかきを行えば圧子に接触する金属面は処女面であろうと考え、高温における引かき抵抗、引かききず巾の測定から摩擦抵抗の温度依存性を調べ、工具切屑接触面での摩擦機構の解明の手がかりとした。

円錐先端圧子で材料を引かく時に生ずる引かき抵抗  $T$  には、圧子が被削材と摩擦しながら滑るために生じた摩擦抵抗  $F$  と被削材を圧子が掘り起して行くのに必要な掘り起し抵抗  $P$  との二種類が含まれていると考えられる。これらの抵抗の間には次の関係が成立つものとする。

$$T - F = P \quad (3-1)$$

今  $s$  を圧子と被削材との間に作用する単位面積当りの摩擦抵抗、 $p$  を圧子が被削材を掘り起し

て行く時に受ける単位投影面積当りの抵抗とし  $A_f$  を圧子と被削材との接触面積の押付け方向への投影面積とすると、被削材に残されたひつかききず巾を  $d$ 、円錐先端圧子の先端半角を  $\varphi$  とおくことにより (3-1) 式は次式に書換えられる。

$$\frac{T}{A_f} = s + \frac{2}{\pi} \cot \varphi \cdot p \equiv S \quad (3-2)$$

縦荷重  $N$  を圧子と被削材との接触面積の押付け方向への投影面積  $A_f = \frac{\pi}{8} d^2$  で割った  $N/A_f$  を  $Y$  とすると、(3-2) 式は次式に書換えられる。

$$\frac{T}{N} = \frac{s}{Y} + \frac{2}{\pi} \cot \varphi \cdot \frac{p}{Y} \equiv \mu \quad (3-3)$$

摩擦応力  $s$  は圧子が被削材と接触滑りを行なうために生ずる抵抗によるものであるから、Bowden<sup>4)</sup>らの摩擦凝着説に従うと被削材の剪断強さに等しい。また  $Y$  は縦荷重をささえ得るに十分なまでに圧子が押込められて接触面積を持つと考えられるから被削材の降伏応力に等しいであろう。

引つかき実験は図3-2に示すように、平行バネ上に固定し電気ヒータに挟まれた被削材に円錐先端圧子を押し付け、ネジ送りにより横移動を与え、生じた引かき抵抗による平行バネの移動距離を電気的な容量変化で読み取り記録することによつて行なわれた。被削材は4-6黄銅 ( $Hv = 160$ ) アルミニウム ( $Hv = 60$ ) を使い、加熱温度は室温～500°Cに変化し、90°～160°の4種の先端角をもつ先端圧子 ( $HSS, Hv = 414$ ) を用いた。

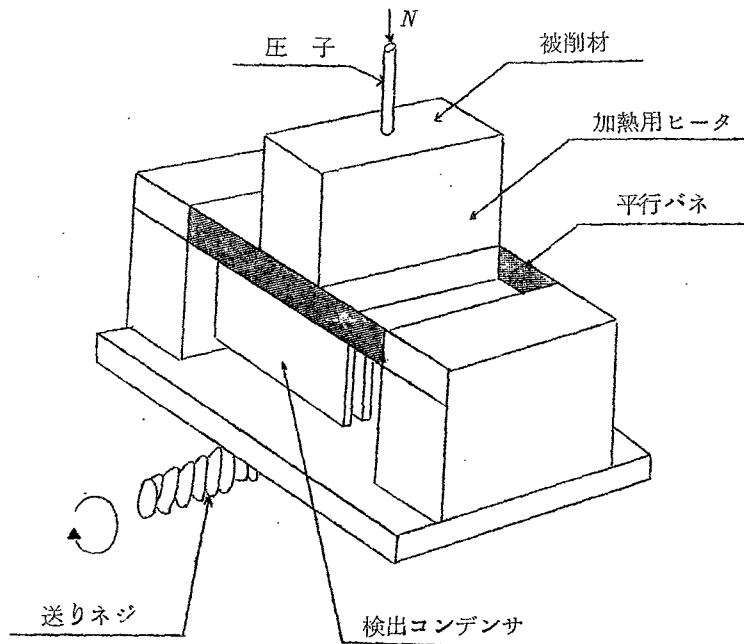


図3-2 引かき抵抗測定装置

(3-2, 5)式で表わされる $S, \mu$ 対 $\cot \varphi$ の関係は図3-3, 4に示すものが得られた。

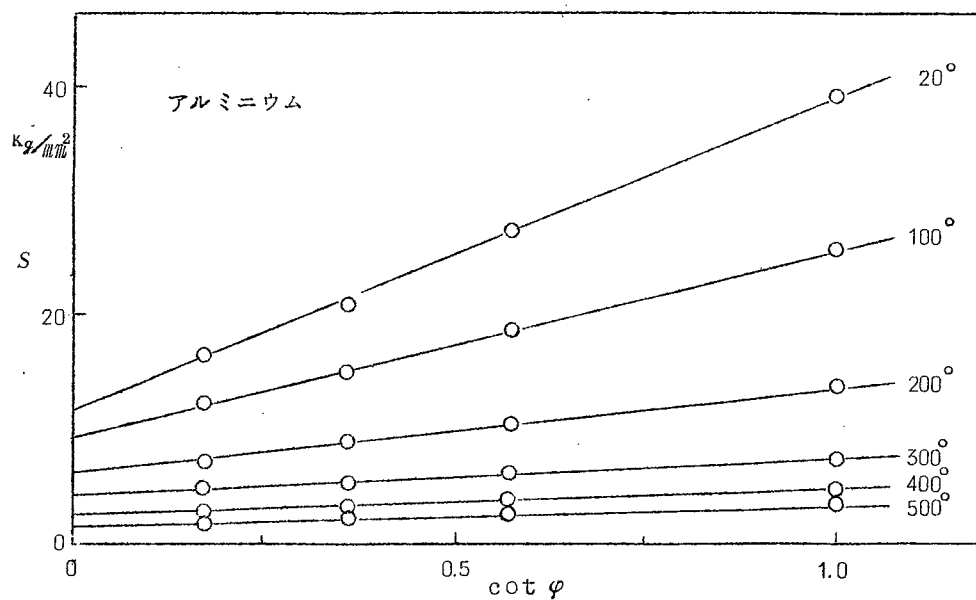


図3-3 先端角対 $S$

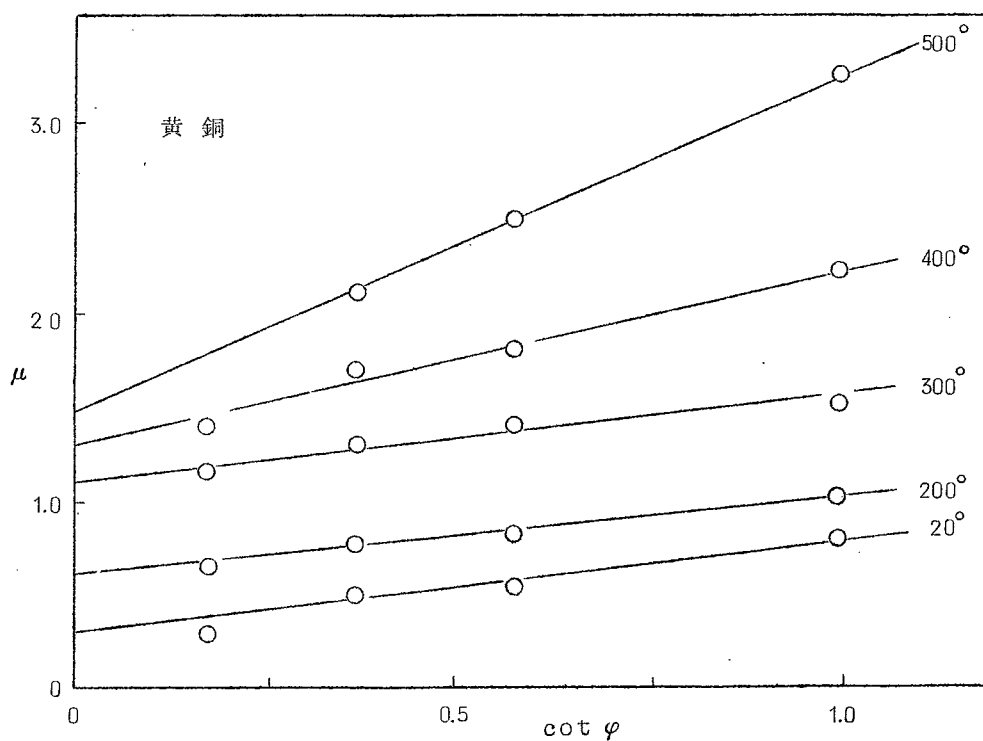


図3-4 先端角対 $\mu$

これらの図で、各測定点の延長線と $\mu$ ,  $S$ 軸との交点での値 $\mu_f$ ,  $s$ は、 $\mu$ ,  $S$ 軸での $\cot \varphi$ の値は零であるから先端角 $\pi$ すなわち掘り起しの行なわれない面対面での単純摩擦係数 $\mu_f$ と被削材の剪断強さ $s$ を示すことになる。したがって被削材の降伏応力も $Y = s / \mu_f$ より求められる。このようにして求められた単純摩擦係数、剪断強さおよび降伏応力と加熱温度 $WH$ との関係を示したものが図3-5, 6である。

剪断強さ、降伏応力は共に温度の上昇に伴い減少している傾向が見られる。黄銅の場合、200℃近傍で急激な減少が見られるが、これは再結晶温度が200℃近傍にあることが原因であろう。単純摩擦係数は温度の変化によつてもそれ程大きく変化していない。すなわち、剪断強さ、降伏応力に与える温度変化の影響は同程度であり、その比として与えられる摩擦係数には互にその影響は打ち消し合つて変化が現われないものと推定される。

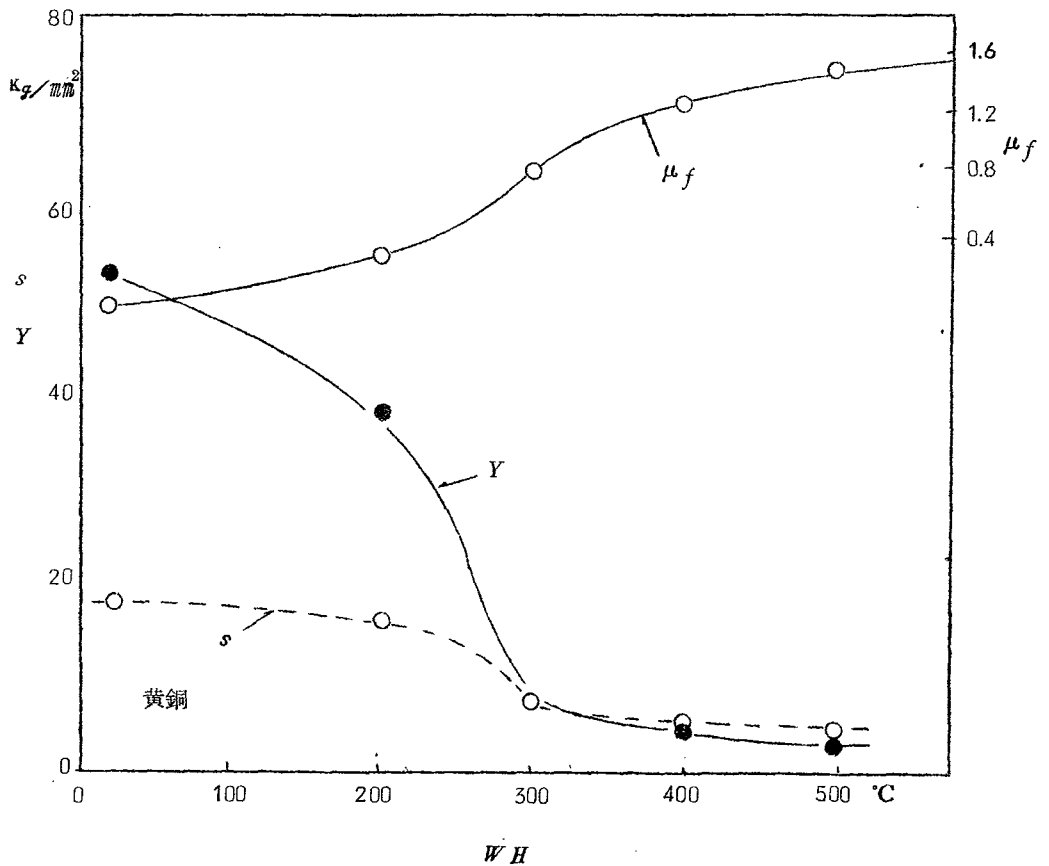


図3-5 被削材温度と $Y$ ,  $s$ ,  $\mu_f$ の関係(I)



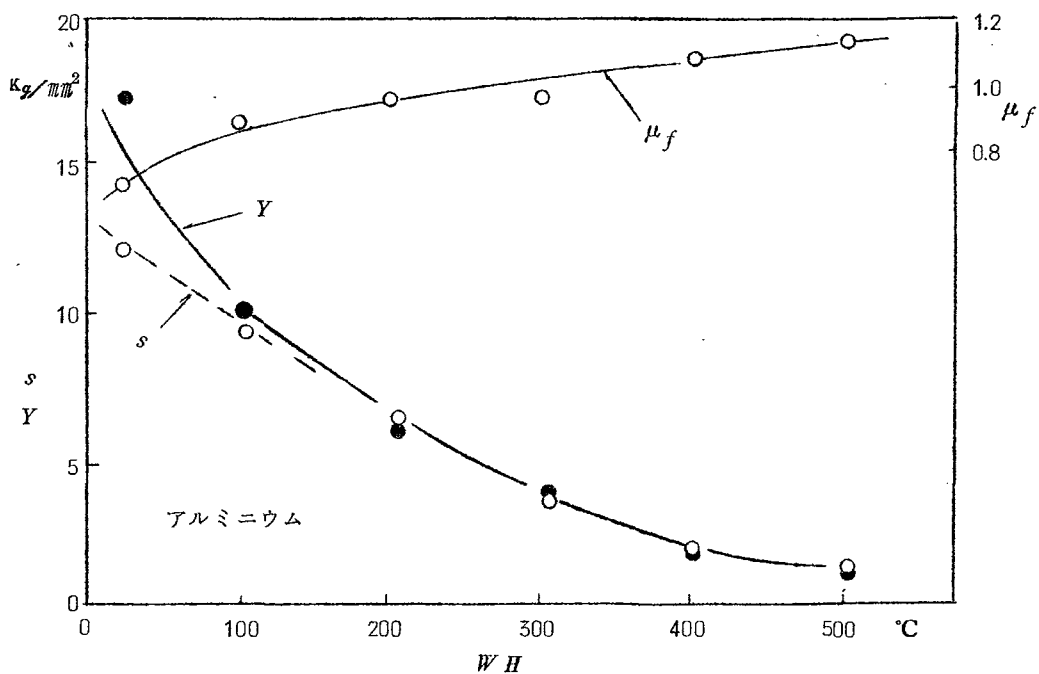


図 3-6 被削材温度と  $Y$ ,  $s$ ,  $\mu_f$  の関係 (II)

### 3.2 工具切屑接触面の摩擦現象

金属切削において、切削抵抗の工具すくい面に対する水平分力  $F$ 、垂直分力  $N$  を工具切屑接触面積  $Ac$  で除した摩擦応力  $s_f = F/Ac$ 、圧縮応力  $\sigma_f = N/Ac$  と切削速度  $U$  との関係を見ると、図 3-7 に示すように摩擦応力は切削速度に関係せずほぼ一定の値をとっており、圧縮応力

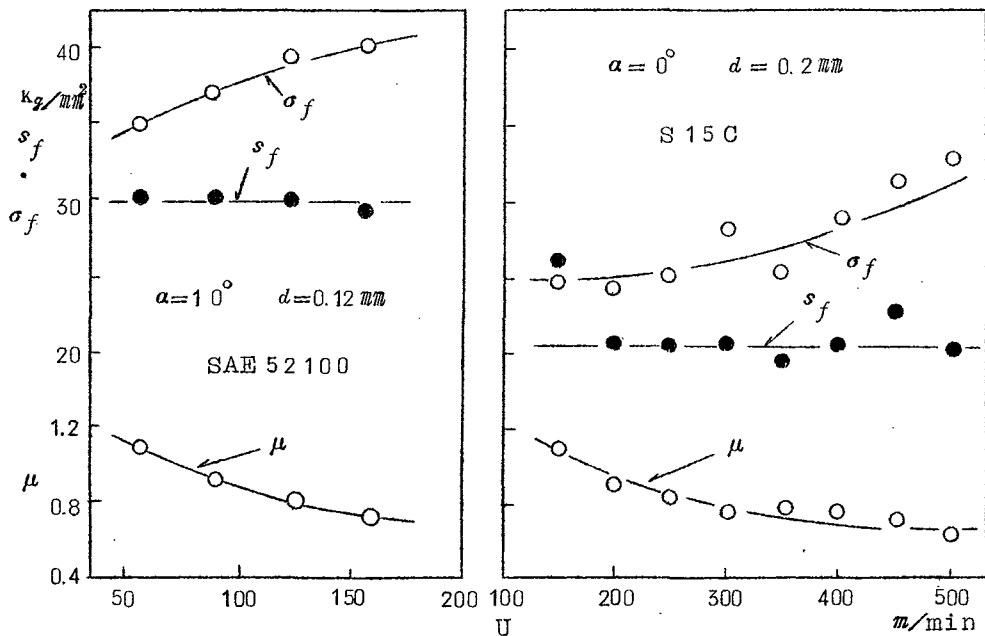


図 3-7 工具すくい面上の切削応力 ( $s_f$ ,  $\sigma_f$ ) と切削速度

の方はむしろいくらか増加している傾向がある。したがってそれらの比として与えられる摩擦係数 $\mu$ は切削速度の増加に伴い減少する傾向を示している。

切削速度の増加は、図3-1で明らかなように切削温度の増加を意味し、前節で示した高温での摩擦実験の結果などで予想される温度上昇に伴い摩擦応力（剪断強さ）、圧縮応力（降伏応力）がいずれも減少する傾向を持つことと、図3-7の結果はその傾向を異にする。したがって、金属切削での工具すくい面で切削と工具との間に見られる摩擦現象では、通常の金属間摩擦とは異なつた現象を考えなければならないであろう。

金属切削の場合での切屑と工具との接触面においても Bowden<sup>4)</sup>らによつて理論づけられている裁着説が成立つものとすれば、切削抵抗の水平分力、垂直分力、摩擦応力、圧縮応力および真実工具切屑接触面積 $A_r$ などの間に次の関係が成立するはずである。

$$\left. \begin{aligned} N &= A_r \cdot Y = A_c \cdot \sigma_f \\ F &= A_r \cdot k = A_c \cdot s_f \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

ここで $Y$ は被削材の降伏応力、 $k$ は剪断強さとする。したがって摩擦係数 $\mu$ は次式で与えられる。

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{k}{Y} = \frac{s_f}{\sigma_f} \quad (3-5)$$

図3-7で摩擦応力が切削速度に関係せずほぼ一定の値を取ることは、(3-4)式より次の関係式

$$\frac{A_r}{A_c} \cdot k = s_f = \text{一定} \quad (3-6)$$

が成立つことになる。したがって、見かけの摩擦応力が切削温度にかかわらず一定ということは、真の摩擦応力 $k$ は温度上昇によつて低下するが真実接触面積と見かけの接触面積の比は増加し、それらの積がほぼ一定の値を示すものと説明されよう。すなわち切削速度が増加するにつれて、見かけの接触面積は次第に真実接触面積に近づくものと推測される。

また図3-7で切削速度の増加に伴ない圧縮応力は増加の傾向を示している。これも温度上昇に伴ない降伏応力が減少する結果に反するようではあるが、見かけの接触面積が真実接触面積に近づくとの推論から、真実の圧縮応力も一定か減少の傾向を取るものと考えられる。そして、この工具切屑接触面での摩擦発熱は極く表層の現象であり、切屑の温度上昇は接触部の極く表層に止つてその内部までほとんどおよんでいないものと考ええると、金属接触部の剪断強さは温度効果を受けて減少するが、降伏応力の温度効果は大きくなく、ほぼ一定の値を持つものと推測されよう。したがって、摩擦係数 $\mu$ の値は切削速度の増加に伴い減少する傾向を持つものと考えられる。

## 4 剪断曲面をもとにした切屑力 - ル理論

### 4.1 切屑の流れ速度勾配

金属切削において最も普通に見られる切屑カール現象について、現場的な現象論的論文は数多くあり、その本質的な成因についても二、三の論文はあるが<sup>5)6)7)8)</sup>、カール生因に対する定説はないようである。著者は、切屑カールの原因は切屑内部の流れ速度に勾配があるためであると考え、この流れ速度勾配を与えるのは剪断面が平面でなく曲面であるためと考えて解析を行なった。

剪断曲面上の一点  $P$  において剪断面を横切つて流れ去る切屑の流れ速度  $V_p$  は、 $U$  を切削速度として次式で与えられる。

$$\frac{U}{V_p} = \sin \alpha + \cos \alpha \cot \theta_p \quad (4-1)$$

ここで  $\theta_p$  は 2 章で名付けられた切線角であり、点  $P$  での剪断曲面の切線と切削方向とのなす角である。したがつて、剪断面が曲面であれば点  $P$  の位置によつて切線角は変化し、切屑の流れ速度は変化することになる。

2 章の解析例に従ひ、剪断曲面は工具刃先で切削方向と  $(\theta_f + \alpha)$  なる初期剪断角をもつて発生するものと仮定し、さらに剪断曲面は半径  $\rho_s$  なる円筒面と仮定することによつて切屑の流れ速度勾配は図 4-1 に示すように求められる。

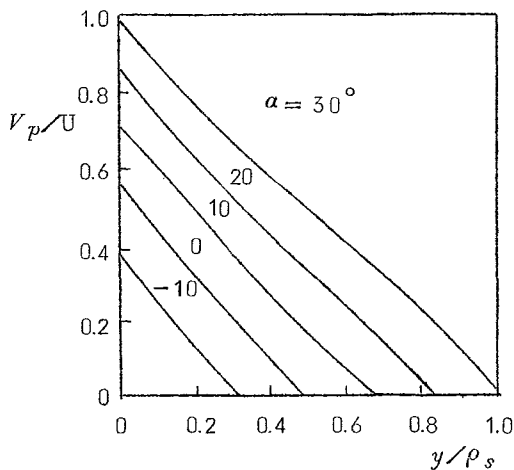


図4-1  $V_p/U$  対  $y/\rho_s$

図 4-1 の横軸  $y$  は工具すくい面からの距離を示す。一定の切削条件のもとでは、剪断曲面の曲率半径  $\rho_s$  と切削速度  $U$  は変化しないから、図 4-1 の曲線群は、切屑内部の流れ速度  $V_p$  と工具すくい面からの距離  $y$  との間に直線関係があることを示しているものと考えられる。したがつ

て、第一近似のオーダで剪断面は半径  $\rho_s$  なる円筒面であるとの仮定は正しいものと考えられる。

工具すくい面上を流れる最大の切屑流れ速度  $V_p(\theta_p = \phi_o)$ 、切屑背面での最小の切屑流れ速度  $V_p(\theta_p = \theta_m)$  は(4-1)式より

$$V_p(\theta_p = \phi_o) = \frac{\sin(\theta_f + \alpha)}{\cos \theta_f} U \quad (4-2)$$

$$V_p(\theta_p = \theta_m) = \frac{\sin \theta_m}{\cos(\theta_m - \alpha)} U \quad (4-3)$$

と導かれる。ここで  $\theta_m$  は2章で名付けられた最小切線角で切削比を与えることによつて(2-10)式より定められる角である。

切屑は剪断面によつてカールするように運命づけられ、工具すくい面に直角な断面上での切屑流れ速度が直線的分布をなしていると仮定したのであるから、切屑カールの曲率半径  $\rho_c$  は図4-2に示すように(4-2)、(4-3)式によつて与えられる速度から次式によつて求められよう。

$$\rho_c = \frac{t \cdot r_f}{r_f - r_m} \quad (4-4)$$

または

$$\rho_c = \frac{d \cdot r_f}{r_c(r_f - r_m)} \quad (4-5)$$

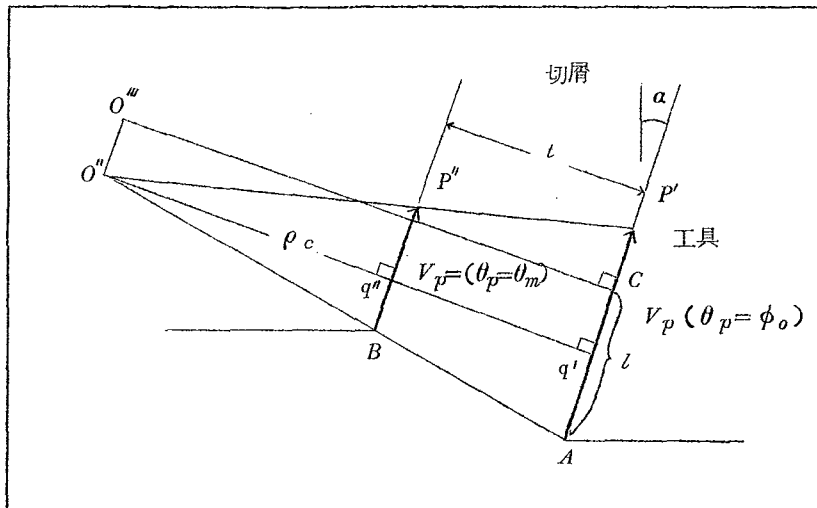


図4-2 切屑カール半径と流れベクトル

ここで  $r_f$ ,  $r_m$  は次式で与えられ,

$$r_f = \frac{\sin(\theta_f + \alpha)}{\cos \theta_f} \quad (4-6)$$

$$r_m = \frac{\sin \theta_m}{\cos(\theta_m - \alpha)} \quad (4-7)$$

$r_c$  は切削比,  $d$  は切込み,  $t$  は切屑厚さである。また工具切屑接触長さ  $l$  と切込み深さ  $d$  との間には (2-21) 式で表わされる関係のあることから, 切屑カール曲率半径  $\rho_c$  は工具切屑接触長さを用いて次式で与えられる。

$$\rho_c = l \cdot \frac{r_f \tan \theta_f \sin \phi}{r_c (r_f - r_m)} \quad (4-8)$$

なお, 切屑は剪断面でカールすべき流れ速度差は与えられるが, 直ちにカールせず, 切屑内の塑性変形が終了してから, 工具すくい面より離れカールし始めるものと考えられる。この切屑内歪の解析<sup>5)6)</sup> は現在十分に行われていす, 今後の問題であろう。

#### 4.2 理論式の吟味と実験結果との比較

チップブレーカを付けていないバイト工具を用いて二次元切削を行ない, 切屑カール曲率半径と切込み深さ  $d$ , すくい角  $\alpha$  および切削速度  $U$  との関係求めたのが図 4-3, 4, 5 である。

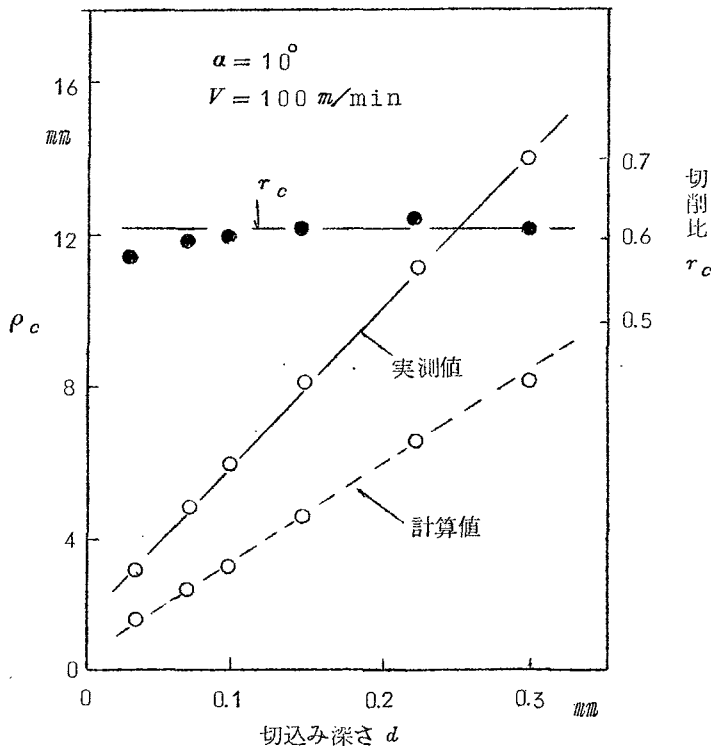


図 4-3 切込み深さと切屑カール半径  $\rho_c$

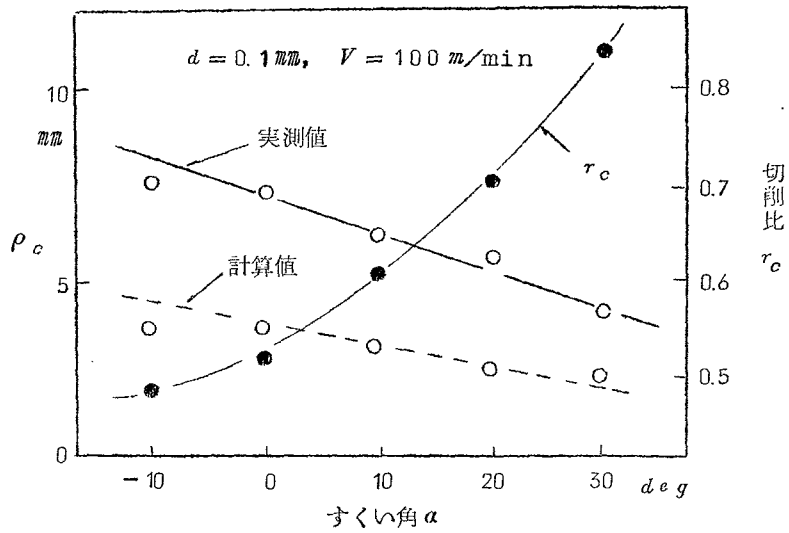


図 4-4 すくい角と切屑カール半径  $\rho_c$

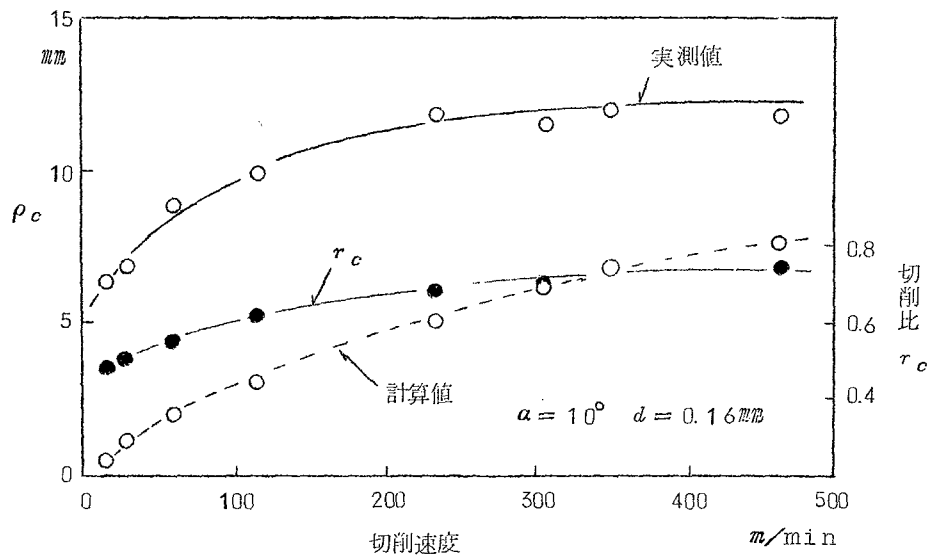


図 4-5 切削速度と切屑カール半径  $\rho_c$

なお切屑カール曲率半径は切削の始りでは小さく、渦巻状に切削距離に比例して増大する。そしてある距離に達すると一定値を取るようになる。上述の各図に示された切屑カール曲率半径はこの一定値に達した値である。

### 1) 切込み深さとの関係

切込み深さと切屑カール曲率半径との関係は(4-5)式すなわち

$$\rho_c = d \cdot \frac{r_f}{r_c(r_f - r_m)}$$

なる関係が導かれた。

角  $\theta_f$  は2章において述べたように切削条件に無関係な被削材による定数と考えられるから、 $r_f$  は被削材および工具すくい角が与えられると一定である。

切削比  $r_c$  は切込み深さが小さくなつてある限界を過ぎると切削比も小さくなるような寸法効果の現われない範囲において切込み深さに無関係で一定である。

$r_m$  も(2-10)式より切削比が一定であるかぎり一定である。

したがつて切屑カール曲率半径は切込み深さに比例する。(図4-3)

### 2) 切削速度との関係

切削速度を増加すると剪断角は大きくなり、切削比  $r_c$  は1に近づく傾向を持つている。

(2-10)、(2-11)式より切削比の増加は剪断曲面の曲率半径の増大を意味している。すなわち、同一すくい角、切込み深さで切削速度の増加は、剪断曲面の曲率半径を増大し、切屑流れ速度勾配を減少し切屑はカールし難くなる。(図4-5)

### 3) すくい角との関係

(4-5)式等の切屑カール曲率半径の理論式から切屑カール曲率半径とすくい角との関係を求めることはできない。しかし剪断曲面の曲率半径が小さいことは、切屑内部の流れ速度勾配が急なことであり、切屑は小さな曲率半径をもつてカールすることになるので、剪断曲面の曲率半径と工具すくい角との間の関係を調べばよい。

初期剪断角と慣用の剪断角との差  $\omega$  の倍角は、剪断曲面の曲率中心より見た剪断面の作る角であり、 $\omega$  が小さい程剪断曲面の曲率半径は大きくなる。図4-4の切削条件で

の  $\omega$  の値は図4-6に示すように、工具すくい角の増加に伴い増大する。すなわち、工具すくい角の増加に伴い切屑カール曲率半径は減少する傾向をもつ。(図4-4)

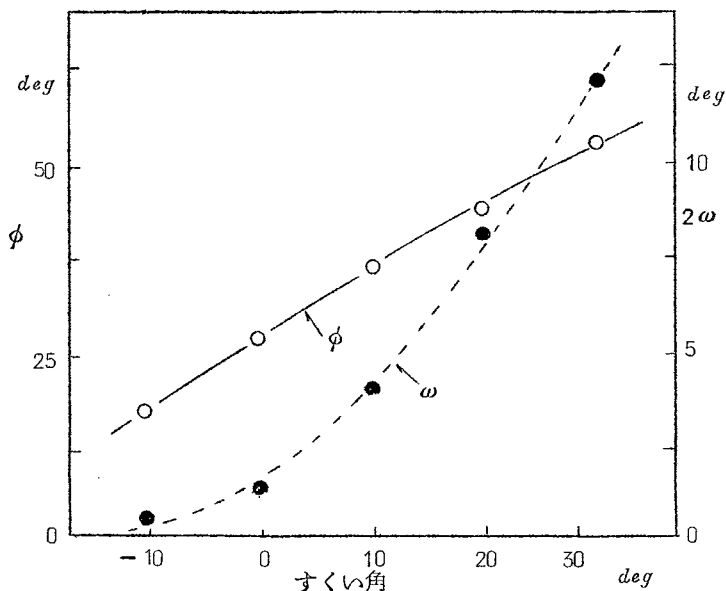


図4-6 すくい角対  $\phi$  &  $\omega$

#### 4) 実験値と計算値

図4-3～5中に示した計算値  $\rho_{calc}$  は、(4-5)式より計算したものである。それらの値はいずれも実測値  $\rho_{obs}$  の方が計算値の約2倍の値になっている。したがって、理論計算において設定した剪断曲面の曲率よりも、実際の剪断曲面の曲率は小さいものと考えられる。これは初期剪断角  $\phi_0$  を  $\theta_f + \alpha$  と仮定したことに起因するであろう。2章において述べたように、角  $\theta_f$  は剪断面上の剪断応力  $s_s$  と工具すくい面上の摩擦応力  $s_f$  の比で決定される角である。

$$\cos 2\theta_f = s_f / s_s$$

工具すくい面上の温度は刃先近傍は低く、刃先より遠ざかるにつれて高くなる温度分布をしている。したがって工具すくい面上の摩擦応力は一定でなく、刃先近傍では大きく、刃先より離れるにつれて切削温度の影響を受けて減少するものと考えられる。また3章の解析によつて、摩擦応力は真実接触面積の考えより、見かけの接触面積で求めた値より大きな値を取るであろうことが推察される。これらのことを考え合わせると、上式で求められた角  $\theta_f$  より初期剪断角で採用されるべき角  $\theta_f$  は小さくなることが推定され、剪断曲面の曲率は小さく現われ、切屑はカールし難く、切屑カール曲率半径は計算値よりも実測値が大きな値を取るであろうことは十分予測されることであろう。

### 5 総 括

I) 切削加工後の切屑の側面を観察すると、金属結晶粒はある曲線にそつて並んでいるかのように見られる。R. Hill によると、剪断歪  $\gamma$  を受ける等方性材料内の微小要素の変形は、歪の方向を基準にして最大伸び方向  $\theta$  の方向に伸び、あたかもこの方向に並んでいるかのように観察されると報告されている。この考え方を、切削後の切屑側面に見られる結晶粒線模様に適応すれば、切屑が剪断面において単一歪を受けているならばこの結晶粒線模様は直線となるはずである。しかし観察されたものは曲線である。すなわち、切屑は剪断面で単一歪を受けず、不同歪を受けていることになる。したがって剪断面は曲面であろうと推論した。著者はこの剪断面を円筒面と仮定して解析を試みた。

解析を進める上に定量的な剪断曲面を設定する必要上、工具刃先で発生する剪断曲面の切削方向となす角(初期剪断角)の設定を試みた。

剪断曲面と工具すくい面との間の切屑も塑性状態にあり、剪断曲面は工具刃先より最大剪断応力の方向に発生するものと仮定すると、初期剪断角  $\phi_0$  は

$$\phi_0 = \theta_f + \alpha$$

$$\text{但し } \theta_f = \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{s_f}{s_s}$$



と書き表わされる。 $\sigma_s$ は被削材の単純剪断応力であるが、加工硬化、歪速度、温度変化等を考慮に入れば、普通の材料試験等で得られる値を用いるよりは、剪断面上の平均剪断応力を採用した方がよいであろうと考えて初期剪断角を設定した。興味深いことは、切削現象におけるこの平均剪断応力 $\sigma_s$ は切削条件に左右されず、ほぼ一定の値を取る。また工具すくい面上の摩擦応力 $\sigma_f$ も切削条件によらない一定の値をとることから、角 $\theta_f$ は切削条件によらない一定の角となる。したがって、初期剪断角は工具すくい角のみに関係する角である。

このようにして剪断曲面を仮定することによつて剪断面上の剪断歪分布から切屑内の金属結晶粒の最大伸び方向を求め、結晶粒線の形の形を決定した。実測される結晶粒線の形とよく一致していることから、剪断面を曲面であると結論した。

なお、初期剪断角の仮定で用いた限界角 $\theta_f$ を用いて、実験的に新しい切削方程式を求めた。

$$\cos(\phi - \alpha + \beta) = \frac{\tan \theta_f}{\cos 2\theta_f} \sin \beta$$

また、工具切屑接触長さを表わす式も導かれた。

$$d = l \tan \theta_f \sin \phi$$

Ⅱ) 今までの切削機構の研究にあまり取り上げられていなかった工具切屑接触面での摩擦応力について考察を行なつた。金属材料をバイト工具で切削する場合、切屑は工具すくい面上を滑りながら排出していく。したがって明らかにこの工具切屑接触面では工具と切屑との間に摩擦現象が存在している。そして、切削条件により定まつた工具切屑接触面積が観測される。切削速度を増加すると、発生する熱も大きくなり、この工具切屑接触面での温度(切削温度)は高くなる。切屑は切削直後のものであるから、工具すくい面と接触している面は処女面であろうと推定される。高温における円錐先端圧子の実験によれば、円錐先端圧子と金属処女面との間に働く摩擦抵抗は、温度の上昇につれて低下する傾向をもつことが明らかにされた。しかし、工具切屑接触面での摩擦応力は切削速度(切削温度)に無関係にほぼ一定の値をとるという特異性を示している。このことは、工具切屑接触面で切屑と工具とは全面接触をしていないことを示すものであろう。そして、低切削速度より高切削速度になるにつれて、工具切屑接触面内の真実接触面積の占める割合は高くなるものと考えられる。

Ⅲ) 金属材料をチップブレーカを付けていないバイト工具を用いて切削した場合でも、切屑はカールすることはよく知られている。この切屑カールの生因について二、三の研究発表があるが未だ定説はないようである。

著者は、切屑カールの原因は切屑内部に生ずる切屑流れ速度に差があるためであると考えて解析を行なつた。そして、この切屑内部の流れ速度勾配を与えるのは、剪断面が今まで云われていたように平面でなく、曲面であるためであると考えて、切屑カール曲率半径を表わす式を導いた。

剪断曲面を横切つて進む被削材の金属粒子の流れ速度 $V_p$ は $\theta_p$ を剪断曲面上の点Pでの切線と切削方向とのなす角(切線角)とすると

$$U/V_p = \sin \alpha + \cos \alpha \cot \theta_p$$

で表わされる。ここで  $U$  は切削速度である。したがって剪断曲面を横切つて流れる切屑の流れ速度は切線角によつて変化する。そしてこの剪断曲面によつて生じた切屑の流れ速度勾配によつて切屑はカールすると考えた。

剪断面は、工具刃先で切削方向と  $(\theta_f + \alpha)$  なる角をもつて発生し、剪断曲面は半径  $\rho_s$  なる円筒面と仮定することにより切屑の流れ速度勾配を決定した。剪断曲面が円筒面であると仮定してもそのふくらみ量は切込み深さの 10～20% の値であり、剪断曲面部を側面より観察しても、そのふくらみ量は観測できない程度であろう。しかし、このようにゆるやかな曲率であつても切屑の流れ速度勾配に大きな影響を与え切屑カールの原因となるものである。

切屑内部の切屑流れベクトルを考えることによつて、切屑カールの曲率半径  $\rho_c$  は

$$\rho_c = \frac{d \cdot r_f}{r_c (r_f - r_m)}$$

で与えられる。ここで

$$r_f = \frac{\sin(\theta_f + \alpha)}{\cos \theta_f}, \quad r_m = \frac{\sin \theta_m}{\cos(\theta_m - \alpha)}$$

であり、 $r_c$  は慣用の切削比である。 $\theta_m$  は剪断曲面の切屑背面での交点での切線角である。この理論式から次のことが云える。

- (1) 切込み深さの増加に比例して切屑カール曲率半径は増加する。
- (2) 切削速度の増加に伴い、切屑カールの曲率半径は増加する。

なお、理論式を用いて計算した値は、実験値の約 1/2 であつた。このことは、剪断曲面の曲率は理論的設定の仮定値より実際のものは小さいことが推定されることを意味する。これは、工具刃先より発生する剪断曲面の初期剪断角  $(\theta_f + \alpha)$  の設定において、見かけの工具切屑接触面積より求められた摩擦応力を用いたことに起因するものと考えられる。定性的にはこの初期剪断角は仮定した設定値より大きな値を取るであろうことは説明されるが、定量的な値を求めることは現在の所不可能である。

## 謝

## 辞

本論文は、東北大学工学部精密工学科佐藤研究室において研究したものをまとめたものである。終始変らぬ御指導下された東北大学、佐藤健児教授に深く感謝の意を表します。また、種々御指導、御批判下された成瀬政男教授、竹山寿夫教授、横堀武夫教授に深く感謝します。なお、当時在学中の佐藤研究室の各位、特に実験に際し努力と助言を下さつた熊沢俊治氏、落合正氏、平田信一氏、二瓶文夫氏、八戸信昭氏、大友明克氏、並びに江藤栄祐氏に深く謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) R.Hill: The Mathematical Theory of Plasticity; Oxford, 1950.
- 2) B.T.Chao, K.J.Trigger and L.B.Zylstra: Thermophysical Aspects of Metal Cutting; Trans.ASME., vol.74, (1952), p.1039.
- 3) 大越諄: 高速切削並びに高温切削の研究; 科研機械研究室報告, 昭和30年.
- 4) F.P.Bowden: The Friction and Lubrication of Solids; Oxford, 1950.
- 5) 竹山秀彦: 高速切削の研究(第12報); 精密機械, vol.23, (1957), p.140.
- 6) 奥島啓式, 入見勝人: 二次元切削における切屑の彎曲現象; 精密機械, vol.25, (1959) p.320.
- 7) E.K.Henriksen: The Stress Distribution in the Continuous Chip-A Solution of the Paradox of Chip Curl; Trans. ASME., vol.73, (1951), p.461.
- 8) R.S.Hahn: Some Observation on Chip Curl in Metal Cutting Process under Orthogonal Cutting Condition; Trans. ASME., vol.75, (1953), p.581.

## 審 査 結 果 要 旨

切削機構の研究は、加工技術の基本である切削作用を基本的に説明し、それによつて最終的には切削作業改善に寄与することを目的とするものである。いわゆる切削理論の中核的なものとして、これまでも精細多岐にわたつて多くの研究が行なわれている。しかし、切削現象の重要点のすべてを説明しうる理論はいまだ知見しない。本研究は最も基本的な2次元流れ型切削の場合を取扱い、その特長とすることは、従来平面として論議されてきたせん断面は実は曲面と考えるべきことに着目し、この観点から新しい研究を進めた点である。

本論文は5章より成り、第1章は緒論である。

第2章は、切屑内最大伸び方向とせん断面の彎曲に関する研究であつて、本論文の主眼点である。まず、切屑側面を詳細に実験的に調べて、結晶粒がある曲線に沿つて並んでいて粒線を構成していることを見出した。さらに、せん断ひずみを受ける等方性材料内の微小要素の最大伸び方向は、せん断ひずみの値によつて定まる方向を採るという塑性学の原理を適用して、せん断面は彎曲した曲面と考えるべきであることを明らかにした。問題の単純化のために、せん断曲面を円筒面と仮定して、切屑内の結晶粒線模様の数値計算を行ない、実際の切屑の場合における顕微鏡写真と比較し、よく一致することを確かめた。

このせん断曲面を仮定するにあつて、工具刃先より発生するせん断面は切削方向から(すくい角 $+\theta_f$ )という角度を採ると仮定し、限界角 $\theta_f$ を提案した。切削実験結果よりせん断面のせん断応力およびすくい面の摩擦応力を計算し、塑性理論を適用して求めたこの限界角 $\theta_f$ は切削条件に無関係な定数であることが見出された。また、この限界角 $\theta_f$ をもとにして工具-切屑接触長さを表わす式を導いた。この式は実験結果とかなり良く一致することが示された。さらに、幾何学的な切屑寸法と総合して、限界角 $\theta_f$ を含む新しい切削方程式を導いた。

第3章は、工具-切屑接触面での摩擦応力についての研究である。円すい形試片を用いる高温引引き試験を行なつて、高温では摩擦応力がかなり減少することを明らかにした。しかし、切削試験では切削温度が高くなつても工具すくい面の摩擦応力はほぼ一定であることから、工具-切屑接触面は全面接触ではないことを結論している。

第4章は、切屑のカール現象に関する研究である。第2章で研究したせん断曲面を仮定すれば、切屑内各点の流れ速度は工具すくい面からの距離によつて変つてくことになる。この速度ベクトルの差から、限界角 $\theta_f$ を含む切屑カールの曲率半径を表わす式を導いた。この式は実測値と少なくとも定性的にはよく一致している。

第5章は、本研究の総括である。

以上を要するに、本論文は切削理論において従来平面と考えて取扱われてきたせん断面を、曲面と考えて取扱うことによつて、切削現象の解明に新しい知見を加えたものであつて、精密加工学の進展に貢献したものである。

よつて、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。